

フランジ貫通型鉄道橋床組連結部の疲労強度

FATIGUE STRENGTH OF RAILWAY PLATE GIRDER WITH WEB PENETRATION

坂野昌弘*、三上市蔵**、村山弘***、森脇清隆****

Masahiro SAKANO, Ichizou MIKAMI, Hiroshi MURAYAMA and Kiyotaka MORIWAKI

*工博	関西大学助教授	工学部土木工学科	(〒564 吹田市山手町3-3-35)
**工博	関西大学教授	工学部土木工学科	(同上)
***工修	㈱栗本鐵工所課長	水門鋼管設計部	(〒559 大阪市住之江区柴谷2-8-45)
****	関西大学大学院生	博士課程前期課程	(〒564 吹田市山手町3-3-35)

Fatigue test of plate girder specimens with web penetration is carried out in order to investigate the fatigue strength of through-type beam-to-beam joints in railway bridges. The number of specimens is three in all. One has a groove welded joint and the other two have a fillet welded joint with a gap between the slot hole and flange plate (d) of 1mm and 2mm. As a results, fatigue limit of fillet welded specimens is about 20% lower than that of the groove welded specimen. However, there is no obvious difference in fatigue strength between fillet welded specimens of $d=1\text{mm}$ and 2mm . Fatigue strength of all specimens, expressed by the principal stress, satisfies JSSC category F sufficiently. And the difference in fatigue strength between the groove welded specimen and fillet welded ones can be estimated by an effect of the weld toe configurations on the stress distribution.

Key Words: fatigue test, railway bridge, floor system, web penetration

1. はじめに

鋼橋の主桁と横桁あるいは横桁と縦桁などの床組連結部において突き当たる方の下フランジを打切った場合には、打ち切り位置で断面が急減するために腹板の切欠き部から疲労亀裂が発生しやすい¹⁾。このような切欠き部の疲労損傷は、下フランジを打ち切らずに相手の桁に連結し断面の急変箇所を取り除くことによって防ぐことができる。しかし、その場合には突き当てられる桁の腹板に新たに溶接継手加わることになり、その継手部に対する疲労照査が必要となる。

小さい方の桁の下フランジを大きい方の腹板に連結する場合、ガセットを用いる方法とそのまま下フランジを貫通させる方法がある。前者の面外ガセット型継手の疲労強度に関する研究はいくつか行われている^{2)~7)}が、後者の貫通型継手に関する研究は非常に少ない。

最近、道路橋において主桁と横桁フランジの取合部の主桁腹板側溶接止端部に疲労亀裂が発見されている^{8)~9)}。このタイプの亀裂は主桁応力に直交しており、そのまま進展すれば主桁の破壊に繋がる非常に危険性の高いものである。町田ら¹⁰⁾は道路橋で用いられるスカーラップ付の貫通型継手の疲労試験を行い、それらの疲労強度はガセット型よりも低くJSSC疲労設計指針¹¹⁾のG等級を

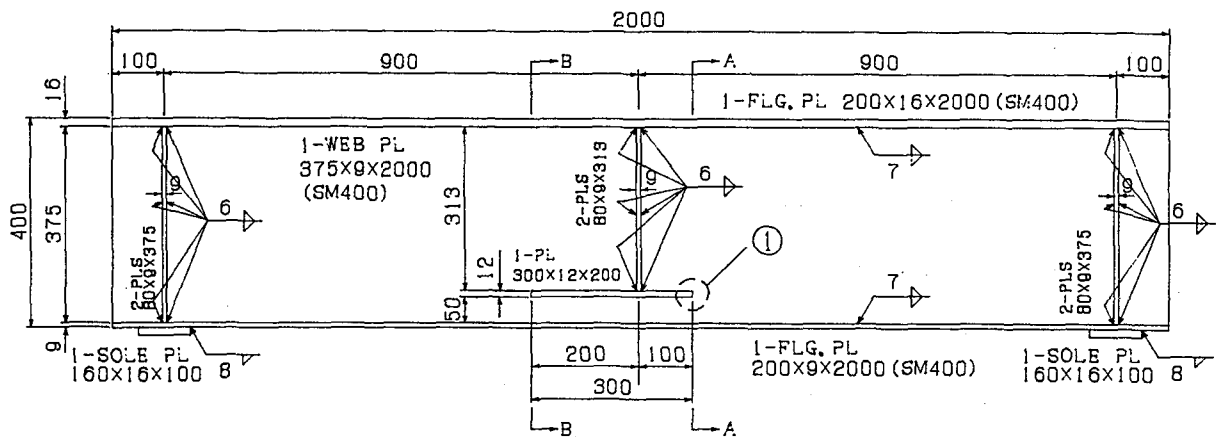
下回ることを報告している。

本研究では、鉄道橋で用いられるフランジ貫通型床組連結部を対象として疲労試験を行い、その疲労強度特性を検討する。実際のディテールでは貫通部の継手は開先をとった完全溶け込み溶接であるが、比較のためにすみ肉溶接で組み立てた試験体（貫通部の隙間が $d=1\text{mm}$ と 2mm ）についても疲労試験を行った。また、それらの試験体ごとの疲労強度の違いに対して、疲労亀裂進展解析による定量的な評価を試みた。

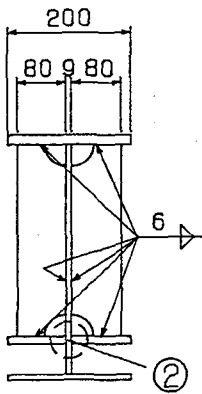
2. 実験方法

2.1 試験体

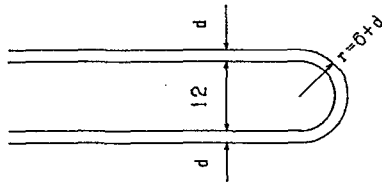
フランジ貫通型溶接継手試験体の形状と寸法、および貫通部の詳細を図-1に示す。試験体は全長2000mm、高さ400mmのI型断面のプレートガーダーである。スパン中央にフランジ貫通型のディテールを設けてある。実際のディテールでは貫通部は開先を設けた完全溶け込みとしているが、ここでは比較のために製作の手間が少ないすみ肉溶接を用いて接合した試験体も製作した。不溶着部の隙間の大きさ d は1mmと2mmの2種類とした。仮付け溶接後に測定した d の値は、それぞれについて、0.5mm~1.7mm(平均1.1mm)、1.0mm~2.8mm(平均2.1mm)



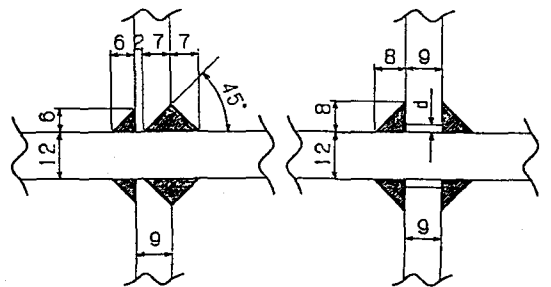
(a) 側面図



(b) 断面図 (中央部)



(c) 貫通部詳細図 (①)



Groove Type Fillet Type (d=1mm, 2mm)

(d) 貫通部詳細図 (②)

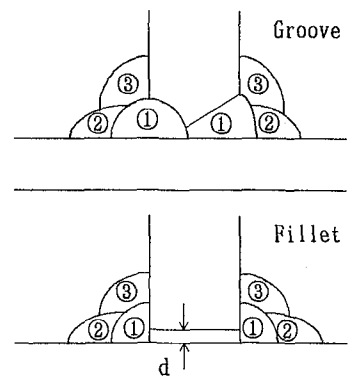
図-1 試験体図 (寸法の単位はmm, 特記なき鋼材はSS400)

表-1 鋼材の機械的性質と化学成分

Material	Mechanical Properties			Chemical Composition (%)				
	Y.P. (MPa)	T.S. (MPa)	EL. (%)	C ×100	Si ×100	Mn ×100	P ×1000	S ×1000
SM400A	318	459	29	16	16	71	14	5
SS400	301	454	27	16	16	74	16	6

表-2 溶接条件

d (mm)	Welding Type	Voltage (V)	Current (A)	Pass	Speed (cm/min)	Heat Input (kJ/cm)
0	Groove	28	230	①	21	18.2
				②	28	14.0
				③	20	19.4
1	Fillet		200	①	35	9.5
				②	24	14.2
				③	24	14.1
2			220	①	33	11.1
				②	32	11.4
				③	30	12.3



である。鋼材はフランジとウェブにSM400、それ以外はSS400を用いた。試験体の組立はフラックス入りワイヤYFW24を用いたCO₂ ガスアーク溶接により行った。鋼材の機械的性質と科学成分を表-1に、溶接条件を表-2に示す。

すみ肉溶接継手の疲労挙動は、亀裂発生位置となるすみ肉溶接止端部の局所的な形状に大きく影響を受けることが知られている^{1,2)}。図-2に、シリコン型取り材を用いて測定したすみ肉溶接止端部の角度 θ と曲率半径 ρ の分布を示す(ρ 、 θ の定義は表-4を参照)。グループ溶接試験体の ρ が、すみ肉溶接試験体に比べて大きくになっている。貫通部の隙間を変えて3体の試験体を製作したが、隙間の他にもこのような溶接部の形状が疲労強度に影響をおよぼす可能性がある。

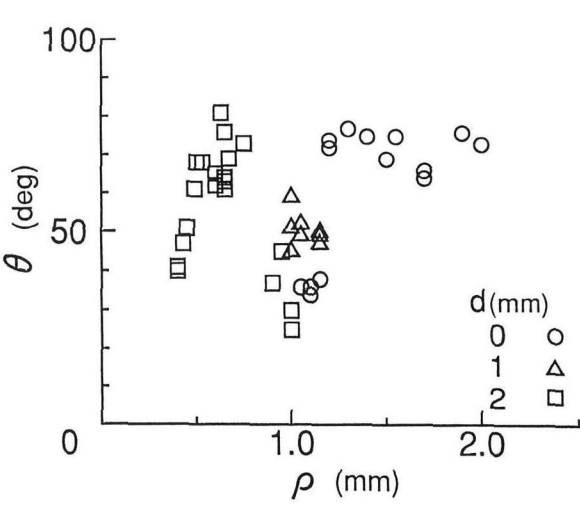


図-2 溶接止端の角度と曲率半径の分布

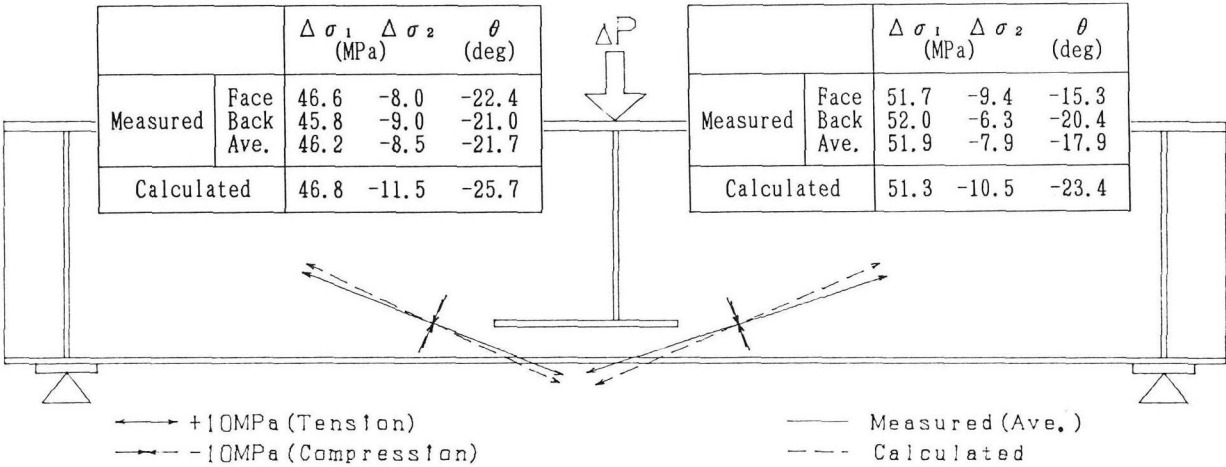


図-3 主応力図 ($\Delta P=157\text{kN}$)

2.2 疲労試験方法

疲労試験には動的容量 $\pm 400\text{kN}$ の電気油圧式疲労試験機を用いた。载荷方法は2点支持の中央1点载荷とし、死荷重応力の影響を考慮して全ての試験体で引張フランジの最大応力が 140MPa 程度となるように最大荷重を 294kN に設定した。荷重繰返し速度は $5\sim 6\text{Hz}$ である。

疲労試験に先立ち、静的载荷時の試験体の応力測定を行った。貫通部の応力集中の影響を避けるため、貫通板の縁端部のすみ肉溶接止端部より、それぞれ 100mm 離れた位置の表裏両面に3軸ひずみゲージ(ゲージ長 2mm)を貼付し、主応力 σ_1 、 σ_2 とその角度 θ を求めた。図-3にそれらの値、およびゲージ貼付け位置の曲げモーメントとせん断力から求めた計算値を示す。両者は非常によく一致している。したがって、疲労試験結果を整理する際の応力値として、亀裂発生位置の曲げモーメントとせん断力から計算された応力範囲を用いた。

疲労試験中亀裂の検出には磁粉深傷法を用い、亀裂発見後は荷重範囲を半減させて、疲労破面にビーチマーク

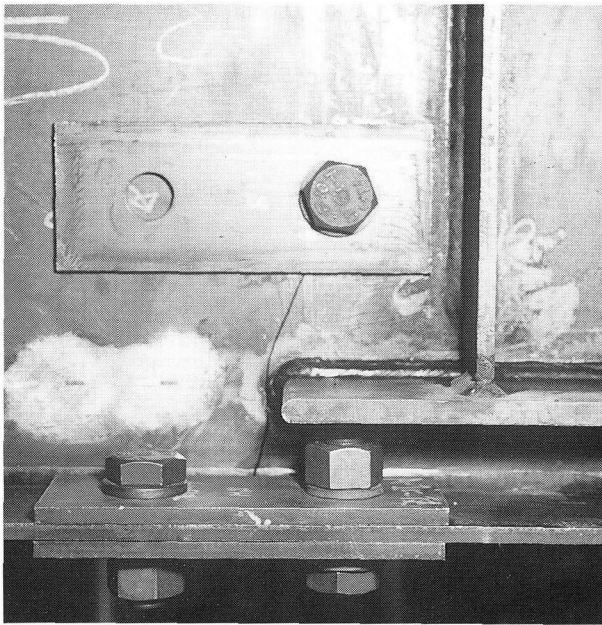


図-4 補強状況

を印した。亀裂が成長し下フランジが破断した場合には、添接板と高力ボルトを用いて試験体を補強し、試験を続行した。補強状況を図－4に示す。

3. 疲労試験結果

3.1 疲労破壊状況

疲労試験結果を表－3に示す。 ΔP は荷重範囲、 $\Delta \sigma$ と $\Delta \tau$ は曲げモーメントとせん断力から求めた亀裂発生位置の曲げ引張り応力範囲とせん断応力範囲、 $\Delta \sigma_1$ 、 $\Delta \sigma_2$ 、 θ は $\Delta \sigma$ と $\Delta \tau$ から求めた主応力範囲とその角度、 N_d は疲労亀裂発見時の寿命、 N_f はフランジの破断寿命である。 a_d と $2b_d$ はビーチマークから読みとった発見時の亀裂の深さと表面長さである。なお、これらの寿命にはビーチマーク用の半減荷重の繰返し回数は含まない。試験体はグループ溶接とすみ肉溶接($d=1$ 、 2mm)の

3体である。 $d=2\text{mm}$ の試験体については $\Delta P=127\text{kN}$ で1000万回以上の繰返しで亀裂が生じなかったので、 $\Delta P=157\text{kN}$ に荷重範囲を上げて再試験を行った。

$d=1\text{mm}$ の試験体を例にとり、図－5に疲労亀裂の発生状況、図－6に破断状況を示す。他の2体でも破壊状況は同様である。亀裂は貫通フランジ縁端部のウェブ側すみ肉溶接止端から発生し、図－3で示した主応力方向に対してほぼ直角に進展している。同じ試験体について図－7に疲労破面と荷重条件を示す。フランジ縁端部のすみ肉溶接止端から亀裂が発生し、半楕円形状に進展している様子が分かる。破面にはビーチマークの他に、磁粉深傷液によるシミが残されている。図－8にそれらの痕跡から読みとった亀裂深さ a および表面長さ $2b$ と繰返し数 N/N_f の関係を示す。図－8では、疲労亀裂が板厚 9mm を貫通するまでに破断までの寿命のおよそ5割～8

表－3 疲労試験結果

Specimen	ΔP (kN)	Section	$\Delta \sigma$ $\Delta \tau$ (MPa)	$\Delta \sigma_1$ $\Delta \sigma_2$ θ (MPa) (deg)	N_d N_f (Mcycles)	a_d $2b_d$ (mm)
Groove ($d=0\text{mm}$)	196	A-A	59.1 29.0	71.0 -11.9 -18.5	0.8 1.6	7.5 30.0
		B-B	51.7 29.0	64.1 -13.0 -20.4	> 6.8 > 6.8	— —
Fillet ($d=1\text{mm}$)	157	A-A	47.3 23.2	55.8 - 8.5 -19.0	2.5 5.2	3.0 20.0
		B-B	41.3 23.2	50.7 - 9.4 -20.3	>10.0 >10.0	— —
Fillet ($d=2\text{mm}$)	127	A-A	38.4 18.9	46.1 - 7.7 -21.3	>10.4 >10.4	— —
		B-B	33.6 18.9	42.1 - 8.5 -23.2	>10.4 >10.4	— —
Fillet ($d=2\text{mm}$) retest	157	A-A	47.3 23.2	56.8 - 9.5 -19.0	3.7 6.6	3.5 14.0
		B-B	41.3 23.2	51.7 -10.4 -20.3	>13.0 >13.0	— —



図－5 亀裂進展形状 ($d=1\text{mm}$, $N=333$ 万回)



図－6 破断状況 ($d=1\text{mm}$, $N=519$ 万回)

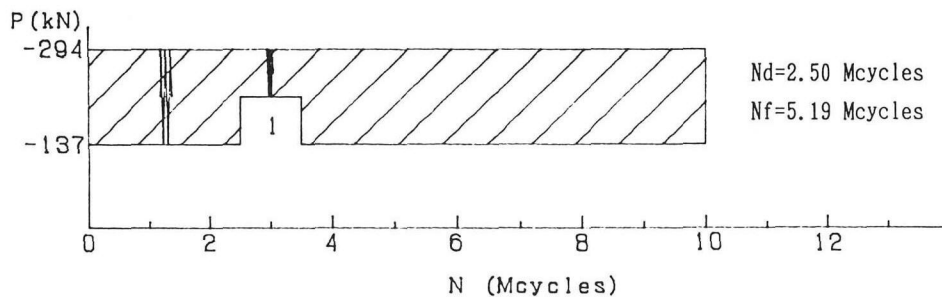
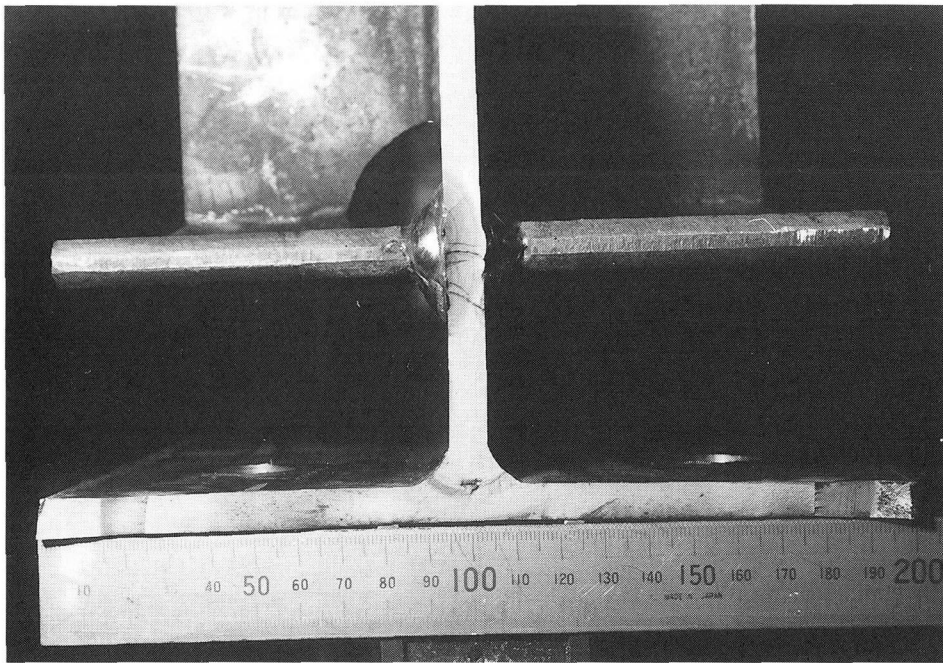


図-7 疲労破面と荷重条件 ($d=1\text{mm}$)

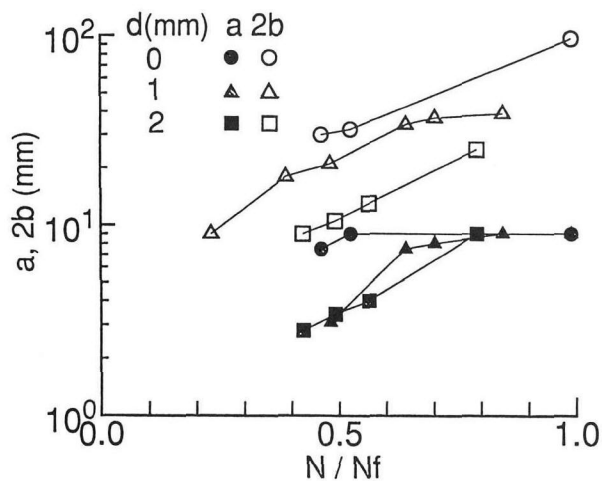


図-8 疲労亀裂進展状況

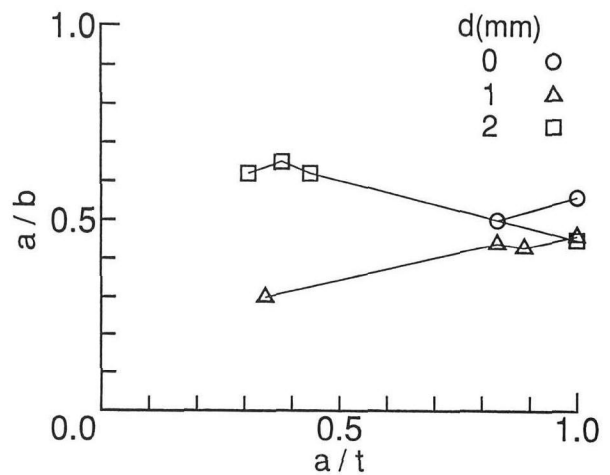


図-9 亀裂形状比の変化

割が費やされている。すなわち、このような場合、疲労限界状態としては板厚貫通を想定するのが妥当であることが分かる。図-9には亀裂形状比 a/b と亀裂深さ比 a/t の関係を示す。 $d=1\text{mm}$ で $a/b=0.3$ 付近の点は、図-

7に示すように複数の亀裂が合体したために b が大きめになったものである。それ以外はほぼ $0.4\sim 0.6$ の範囲に分布している。

3.2 疲労強度

各試験体の $\Delta\sigma$ と、Nd、Nfとの関係を図-10に示す。本研究では、試験終了時に磁粉探傷法によって亀裂が検出されなかった応力範囲を疲労限と定義した。図中には鉄道構造物等設計標準¹³⁾の疲労設計曲線も示してある。図-10では、グループ溶接試験体の疲労限 $\Delta\sigma=52\text{MPa}$ に比べてすみ肉溶接試験体の疲労限は $\Delta\sigma=41\text{MPa}$ と約20%低下している。Nfを基準として $\Delta\sigma$ で評価すれば、全ての試験体の強度等級はG等級ということになる。

ここで対象としているような横桁のウェブでは、曲げ応力 $\Delta\sigma$ に対して比較的大きなせん断応力 $\Delta\tau$ が生じている。そこで、その $\Delta\tau$ を考慮して、最大主応力 $\Delta\sigma_1$ で試験結果をプロットしたのが図-11である。疲労限はグループ溶接試験体の64MPaに比べて、すみ肉溶接試験体の52MPaと20%の低下となる。 $\Delta\sigma_1$ で評価すれば、すべての試験体はF等級を十分に満たす。したがって、このタイプの貫通型継手の強度等級は本質的にはF等級であるといえる。

このように、曲げ応力に比べてせん断力が比較的大き

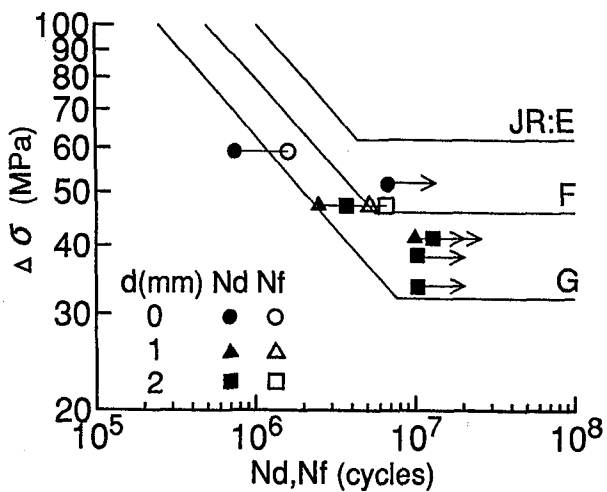


図-10 疲労試験結果（曲げ引張り応力）

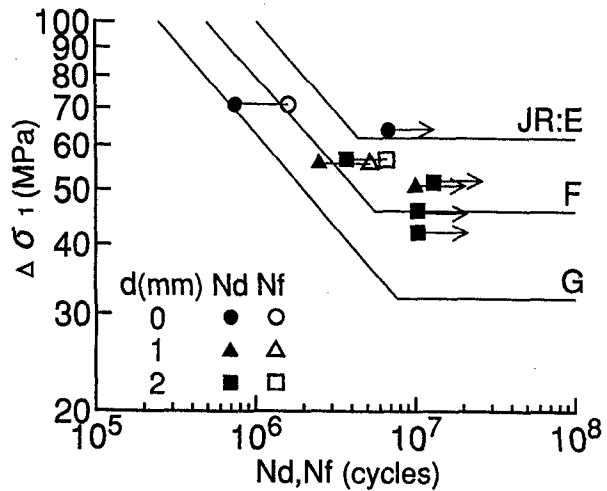


図-11 疲労試験結果（主応力）

い場合には最大主応力を用いることにより、より合理的な疲労設計が可能となる。

4. 疲労亀裂進展解析

疲労試験結果では、試験体によって疲労強度に15~20%の差が見られた。本章では試験体による違い、すなわち貫通部の隙間や溶接部の寸法、形状に着目して疲労亀裂進展解析を行い、疲労強度の違いに対して定量的な評価を試みる。

4.1 解析方法

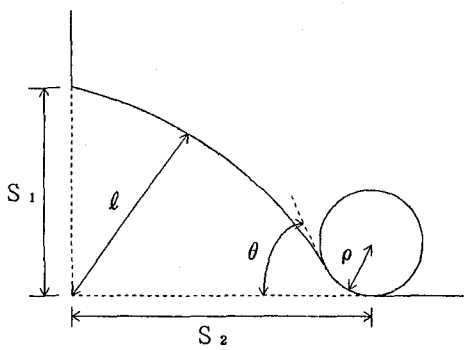
疲労亀裂進展解析の手法は文献6)と基本的に同様である。解析では継手形状の影響は主として応力分布に対する応力拡大係数の補正係数Fgにより評価することができる。ここでは継手部の3次元ソリッド要素を用いたFEM解析¹⁴⁾により補正係数Fgを求めた。

貫通部の隙間サイズd、溶接止端部の曲率半径 ρ 、角度 θ の他に、溶接の脚長 S_1 、 S_2 、のど厚 ℓ について、表-4に示すような解析ケースを設定した。ケースI、II、IIIは、それぞれグループ溶接試験体、すみ肉溶接試験体($d=1, 2\text{mm}$)の試験体で測定した値の平均的なもの、ケースIII-d、III- ρ, θ 、III-d, ρ, θ はケースIIIでd、 ρ と θ 、およびdと ρ と θ の値をそれぞれケースIの値に合わせたものである。図-12に3次元解析モデルの全体図を、図-13に解析ケースI、II、IIIの溶接部付近の拡大図を示す。

それ以外の条件としては、全てのケースに共通に、初期亀裂は深さ 0.05mm ¹²⁾の半楕円形、亀裂形状比a/bは

表-4 解析ケース

Case	d (mm)	ρ (mm)	θ (deg)	S_1	S_2	ℓ (mm)
I	0	1.5	70	9	13	9.5
II	1	1.0	50	10	10	7.1
III	2	0.7	60	10	12	8.0
III-d	0	0.7	60	10	12	8.0
III- ρ, θ	2	1.5	70	10	12	8.0
III-d, ρ, θ	0	1.5	70	10	12	8.0



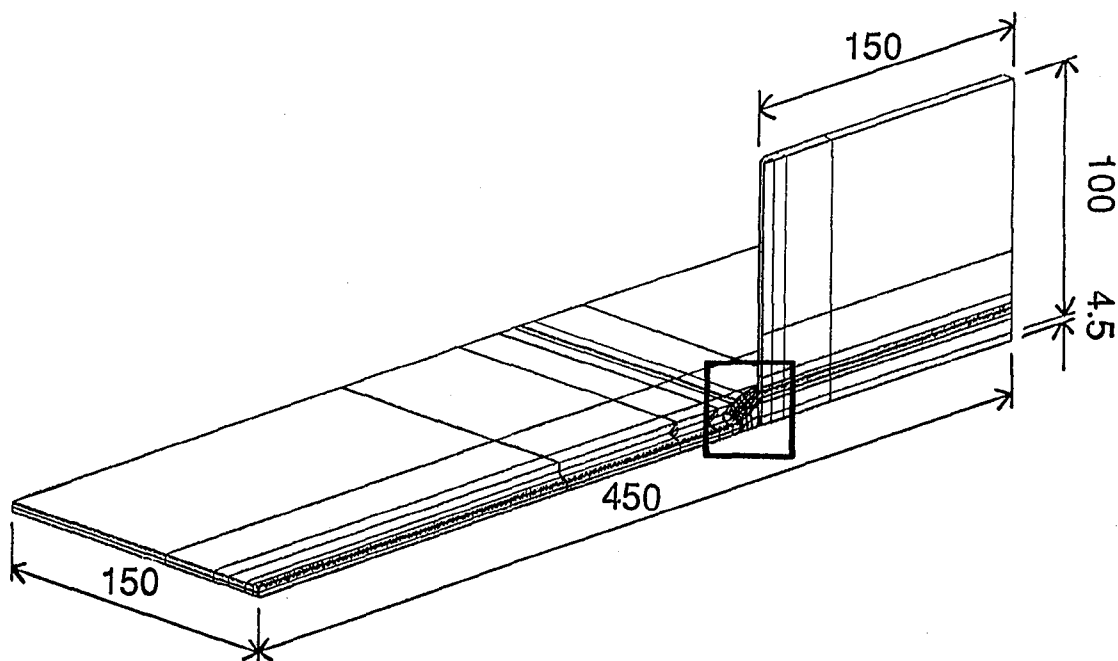
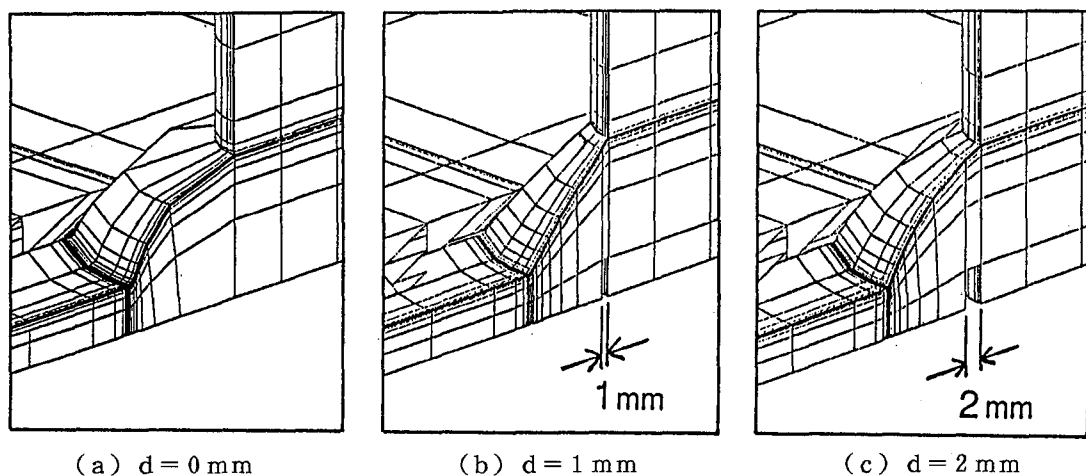


図-12 3次元F E Aモデル



(a) $d = 0 \text{ mm}$

(b) $d = 1 \text{ mm}$

(c) $d = 2 \text{ mm}$

図-13 貫通部拡大図

図-9を参考に0.4、限界亀裂深さを板厚9mmに仮定し、亀裂進展速度は金属材料研究所¹⁵⁾で求めた式(1)を用いた。

$$\frac{da}{dN} = 1.0 \times 10^{-11} \cdot \Delta K^3 \quad (1)$$

(但し、 $\Delta K > \Delta K_{th} = 2.5 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$)

4.2 解析結果

図-14に解析ケースⅠ、Ⅱ、Ⅲについて得られた F_g の分布を示す。初期亀裂深さの $a=0.05\text{mm}$ でみるとⅠと比べてⅡ、Ⅲの F_g がそれぞれ20%、25%程度大きい。図-15にケースⅠ、Ⅱ、Ⅲの寿命曲線と実験値を示す。各寿命曲線はそれぞれ実験値をよく表していることから、解析方法の妥当性が確認できた。

図-16には解析ケースⅠ、ⅢおよびⅢ-d、Ⅲ- ρ 、 θ 、

Ⅲ-d、 ρ 、 θ について、 F_g の分布を示す。Ⅲ-dはⅢとほとんど変わらず、Ⅲ- ρ 、 θ はⅠに近くなる。Ⅲ-d、 ρ 、 θ はⅢ- ρ 、 θ とほとんど変わらない。図-17についても同様の傾向である。すなわち d を変えても強度的にはほとんど影響がなく、疲労強度の違いはほぼ ρ 、 θ の違いによるものであることが分かる。Ⅲ-d、 ρ 、 θ とⅠの違いは S_1 、 S_2 、 ℓ によるものである。以上より、貫通部の1~2mm程度の隙間は疲労強度にほとんど影響を及ぼさないこと、また、グループ溶接試験体とすみ肉溶接試験体の疲労強度の違いは、 d ではなく ρ 、 θ によるものであることが明らかとなった。

また、 $d=1\text{mm}$ および $d=2\text{mm}$ については、隙間ルート部の応力集中が止端部の2/5程度であり、隙間を残してもルート亀裂発生の可能性がほとんどないことを示している。

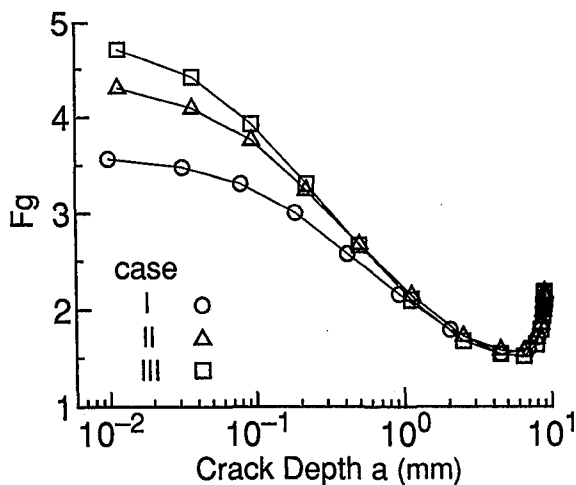


図-14 補正係数 Fg の分布 (ケース I、II、III)

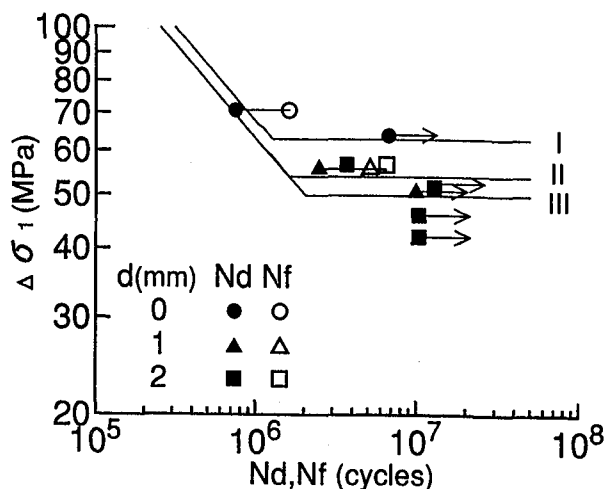


図-15 実験結果と寿命予測曲線の比較

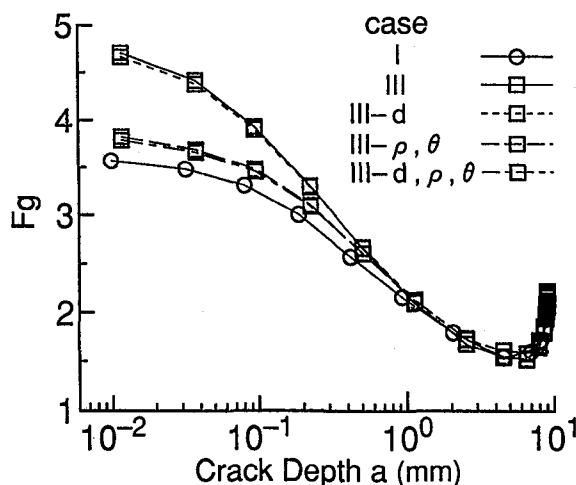


図-16 補正係数 Fg の分布 (ケース III のバリエーション)

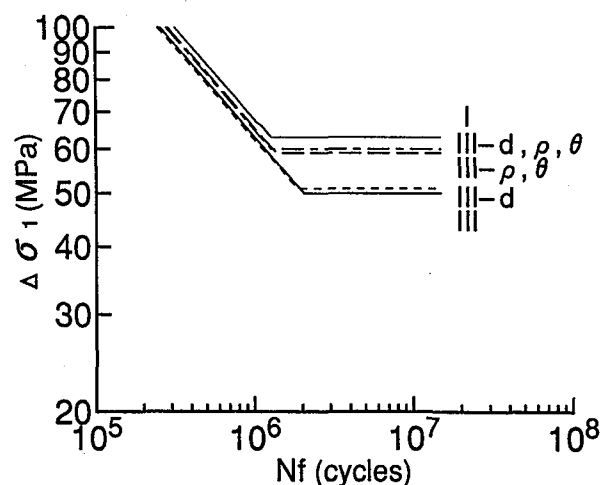


図-17 寿命曲線の比較

5. まとめ

貫通部の隙間を持たないグループ溶接試験体と、隙間を有するすみ肉溶接試験体 ($d=1, 2\text{mm}$) の計 3 体のプレートガーダー試験体を用いて疲労試験を行い、継手部の疲労強度について検討した。得られた主な結論は以下のとおりである。

- (1) 疲労亀裂は貫通フランジ縁端部のウェブ側のすみ肉溶接止端から発生し、主応力に対してほぼ直角方向に進展している。疲労亀裂がウェブの板厚 9mm を貫通するまでに、破断までの寿命の 5 割～8 割が費やされている。また、亀裂形状比は $1/3 \sim 2/3$ 程度である。
- (2) 貫通部に隙間を設けた試験体の疲労限は、隙間なしの試験体と比べて $15 \sim 20\%$ 程度低下する。しかし、隙間の大きさによる疲労強度の違いは認められない。
- (3) 試験体の疲労強度は、曲げ引張り応力でみれば鉄道構造物等設計標準の G 等級程度であるが、せん断応力の影響を考慮した最大主応力で評価すれば F 等級を十分満足する。ここで対象とした横桁のように、曲げモーメン

トに対してせん断力が比較的大きい部材に対しては、せん断応力の影響を考慮することにより、より合理的な疲労設計が可能となる。

- (4) 3 次元 FEM 解析を用いた疲労亀裂進展解析により、試験体の種類による強度の違いは、貫通部の隙間の影響ではなく溶接止端形状の違いによるものであることが明らかとなった。

最後に、本研究の一部が文部省科学研究費補助金によるものであることを記し、関係各位に謝意を表する。

参考文献

- 1) 三木千寿、坂野昌弘、館石和雄、福岡良典：鋼橋の疲労損傷事例のデータベースの構築とその分析、土木学会論文集、第 441 号/I-9, pp. 403-410, 1988.
- 2) 山田健太郎、牧野時則、馬場千尋、菊地洋一：疲労亀裂進展挙動に注目したガセット継手の疲労強度解析、土木学会論文報告集、第 303 号, pp. 31-41, 1980.

- 3) Shimokawa, H. Takena, K. Itoh, F. and Miki, C.: Fatigue Strength of Large-Size Gusset Joints of 800 MPa Class Steels, Structural Eng./Earthquake Eng., Vol. 2, No. 1, pp. 255s-263s, 1985.
- 4) 竹名興英、川上博道、伊藤文夫、三木千寿: ウェブガセット溶接継手の応力解析と疲労寿命予測、土木学会論文集、第392号/I-9, pp. 345-350, 1988.
- 5) 坂野昌弘、新井弘、西村俊夫: すみ肉溶接継手の腐食疲労亀裂発生・進展挙動、構造工学論文集、Vol. 36A, pp. 379-388, 1990.
- 6) 坂野昌弘、新井正樹、三上市藏: 疲労亀裂進展解析による面外ガセット継手の寸法効果の検討、構造工学論文集、Vol. 37A, pp. 503-510, 1991.
- 7) 坂野昌弘、三上市藏、新井正樹、米本栄一、高垣奈津子: 面外ガセット溶接継手の板厚効果に関する疲労実験、構造工学論文集、Vol. 40A, pp. 1255-1264, 1994.
- 8) 首都高速道路公団: 鋼道路橋の疲労、設技 Windows、Vol. 1, pp. 3-4, 1992.
- 9) 米倉徹、長沼敏彦、丸山悟、羽子岡爾郎: 鋼板桁の横桁下フランジ損傷部調査報告、土木学会第49回年次学術講演会、I-215, pp. 428-429, 1994.
- 10) 町田文孝、三木千寿、越後滋、寺本耕一: 貫通型横桁取合い部の疲労特性、土木学会第48回年次学術講演会、I-230, pp. 608-609, 1993.
- 11) 日本鋼構造協会: 鋼構造物の疲労設計指針・同解説、技報堂、1993.
- 12) 三木千寿、坂野昌弘、豊田幸宏: 隅肉溶接止端からの疲労亀裂の発生と初期進展挙動、構造工学論文集、Vol. 35A, pp. 321-328, 1989.
- 13) 鉄道総合技術研究所: 鉄道構造物等設計標準・同解説-鋼・合成構造物、丸善、1992.
- 14) SRAC社: COSMOS/M・コマンドノート、1994.
- 15) 科学技術庁金属材料研究所: 金属材料研究所疲れデータシート、No. 21, 1980.

(1994年9月14日受付)